

OZ 00109

- 1 -

### Außenelektroden an piezokeramischen Vielschichtaktoren

Die Erfindung betrifft die Außenelektroden an piezokeramischen Vielschichtaktoren sowie ein Verfahren zu ihrer Herstellung.

Der Aufbau und die Herstellung von Aktoren und ihren Außenelektroden wird  
5 unter anderem ausführlich beschrieben in DE 33 30538 A1, DE 40 36 287 C2, US 5 281 885, US 4 845 399, US 5 406 164 und JP 07-226541 A.

Ein piezokeramischer Vielschichtaktor ist schematisch in Figur 1 dargestellt. Die Figur 2 zeigt in einem vergrößerten Ausschnitt den Aufbau der Außenelektrode nach dem Stand der Technik und die Figur 3 einen typischen Rissverlauf nach  
10  $10^6$  Belastungszyklen in dem keramischen Werkstoff unter einer Außenelektrode nach dem Stand der Technik. Piezokeramische Vielschichtaktoren 1 werden als Monolithen ausgeführt, das heißt, sie bestehen aus gestapelten dünnen Schichten 2 piezoelektrisch aktiven Materials, beispielsweise Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), mit dazwischen angeordneten leitfähigen Innenelektroden 7, die  
15 alternierend an die Aktoroberfläche geführt werden. Das aktive Material wird als sogenannte Grün-Folie vor dem Sintern durch ein Siebdruckverfahren mit Innenelektroden 7 versehen, zu einem Stapel verpresst, pyrolysiert und dann gesintert, wodurch ein monolithischer Vielschichtaktor 1 entsteht.

Außenelektroden 3, 4, 8 verbinden die Innenelektroden 7. Dadurch werden die  
20 Innenelektroden 7 jeweils auf einer Seite des Aktors 1 elektrisch parallel geschaltet und so zu einer Gruppe zusammengefasst. Die Außenelektroden 3, 4 sind die Anschlusspole des Aktors. Wird eine elektrische Spannung an die Anschlusspole gelegt, so wird diese auf alle Innenelektroden 7 parallel übertragen und verursacht ein elektrisches Feld in allen Schichten des aktiven  
25 Materials, das sich dadurch mechanisch verformt. Die Summe aller dieser mechanischen Verformungen steht an den Endflächen des Aktors als nutzbare Dehnung 6 und/oder Kraft zur Verfügung.

1001648 110101

OZ 00109

- 2 -

Die Außenelektroden 3, 4, 8 an den piezokeramischen Vielschichtaktoren 1 sind wie folgt aufgebaut: Auf die zu einem Stapel gepressten dünnen Schichten 2 des piezoelektrisch aktiven Materials wird im Bereich der herausgeführten Innenelektroden 10, beispielsweise durch galvanische Verfahren oder Siebdruck von Metallpaste, eine Grundmetallisierung 3 aufgebracht. Diese Grundmetallisierung 3 wird durch eine weitere Schicht 4 aus einem metallischen Werkstoff verstärkt, beispielsweise durch ein strukturiertes Blech oder ein Drahtnetz. Die Verbindung der Verstärkungsschicht 4 mit der Grundmetallisierung 3 erfolgt beispielsweise mittels einer Lotschicht 8. An die Verstärkungsschicht 4 wird der elektrische Anschlussdraht 5 gelötet.

Derart aufgebaute Außenelektroden weisen einen gravierenden Nachteil auf. Während des Betriebes wirken auf den Isolierbereich 11, der unter der Grundmetallisierung 3 liegt, starke Zugspannungen. Da dieser Isolierbereich 11 zusammen mit der Grundmetallisierung 3 und der Verbindungsschicht 8, in der Regel eine Lotschicht, eine homogene Einheit bildet, versagt diese beim Überschreiten der Zugfestigkeit des schwächsten Gliedes und es bilden sich Risse. Die Risse laufen gewöhnlich von der spröden und wenig zugfesten Grundmetallisierung 3 in den Isolierbereich 11 und werden dort von Bereichen mit hohen Zugspannungen eingefangen, bevorzugt an den Elektrodenspitzen 9 der nicht die Grundmetallisierung 3 berührenden Elektroden 12, oder sie beginnen in den Bereichen maximaler Zugspannung an den Elektrodenspitzen 9 und verlaufen in Richtung Grundmetallisierung 3. Diese typischen Risse 14 sind in Fig. 3 dargestellt.

Die Ausbreitung eines Risses 13 entlang einer die Grundmetallisierung 3 berührenden Innenelektrode 10 ist als unkritisch einzustufen, da ein solcher Rissverlauf die Funktion des Aktors nicht beeinträchtigt. Risse 14 dagegen, die unkontrolliert durch den Isolierbereich 11 verlaufen, sind sehr kritisch, da sie den Isolationsabstand verringern und die Wahrscheinlichkeit eines Aktorausfalls durch Überschlüsse stark erhöhen.

10016488-110101

OZ 00109

- 3 -

Problemlösungen werden zum Beispiel in den Patentanmeldungen DE 198 60 001 A1, DE 394 06 19 A1, DE 196 05 214 A1 beschrieben. Es wird dort vorgeschlagen, den Bereich zwischen einer nicht die Grundmetallisierung berührenden Elektrode und der Grundmetallisierung mit einem Füllmaterial  
5 geringer Zugfestigkeit oder einem Hohlraum zu versehen. Die wesentlichen Nachteile dieser Vorgehensweise sind darin zu sehen, dass das Füllmaterial mit einem zusätzlichen, komplexen Verfahrensschritt aufgebracht werden muss, dass das Füllmaterial unvermeidbar die Eigenschaften der Aktors negativ beeinflusst und im Falle der eingebrachten Hohlräume diese in einem weiteren  
10 Verfahrensschritt vor dem Aufbringen der Grundmetallisierung wieder geschlossen werden müssen.

Eine andere Problemlösung wird in DE 199 28 178 A1 vorgeschlagen. Hier wird der monolithische Aufbau in kleine Teilbereiche zerlegt und alternierend mit inaktiven, elektrodenfreien Bereichen wieder aufgebaut. Hierbei soll innerhalb  
15 eines aktiven Bereiches die maximal mögliche Zugspannung unterhalb des zur Rissbildung notwendigen Wertes bleiben. Das Verfahren ist fertigungstechnisch schwierig und führt nicht zur notwendigen Reduktion der Spannungen im Isolierbereich, so dass immer eine latente Rissgefahr bestehen bleibt.

Aufgabe der Erfindung ist es, die Außenelektroden an Vielschichtaktoren so zu gestalten, dass die Ursachen zur Rissbildung in den Aktoren möglichst vermieden werden und dass beim Auftreten von Rissen deren Verlauf so  
20 gesteuert wird, dass er nicht zur Zerstörung der Aktoren führt.

Die Lösung der Aufgabe erfolgt erfindungsgemäß dadurch, dass die Grundmetallisierung der Außenelektrode nicht mehr eine geschlossene Fläche bildet, sondern strukturiert ist, wobei die Strukturierung durch Unterbrechungen oder Ausnehmungen gebildet wird. Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der  
25 Erfindung werden in den abhängigen Ansprüchen beansprucht.

10016488 110101

- 4 -

Durch die Strukturierung der Grundmetallisierung in der Außenelektrode wird die Steifigkeit des Verbundes, bestehend aus Keramikoberfläche, Grundmetallisierung und Verbindungsschicht, insgesamt herabgesetzt, wodurch bei auftretenden Rissen Vorzugsrichtungen für die Rissausbreitung erzeugt werden. Die Strukturierung bewirkt, dass die mechanische Rückwirkung der Außenelektrode auf den Aktor und damit auch der Risseintrag verringert wird, ohne die Haftfestigkeit der Außenelektrode und die sichere Kontaktierung der Innenelektroden zu gefährden.

Die durch die Strukturierung der Grundmetallisierung müssen allerdings Flächen verbleiben, die mindestens so groß sind, dass jeweils benachbarte Innenelektroden durch mindestens eine Fläche miteinander verbunden sind.

Weiterhin entstehen durch die Unterbrechung der Grundmetallisierung in der Außenelektrode an der Aktoroberfläche Bereiche, in denen zwischen der Verbindungsschicht, die die Verstärkungsschicht mit der Grundmetallisierung verbindet, insbesondere bei einer Lotschicht, und den nach außen führenden Innenelektroden eine Wechselwirkung stattfindet. Durch die Unterbrechungen in der Struktur der Grundmetallisierung kann beim Auflöten der Verstärkungsschicht Metall aus dem Lot in die Innenelektroden einlegiert werden. Die Folge ist, dass die Isolierbereiche an diesen Stellen geschwächt werden, wodurch Vorzugsstellen für mögliche Rissbildungen und den Rissverlauf entstehen. Durch die Steuerung von Lötzeit und Löttemperatur kann der Eindringeffekt so eingestellt werden, dass beim späteren Betrieb des Aktors nahezu jede Innenelektrode zur Leitfläche für einen entstehenden Riss wird. Das Gefüge des Isolierbereichs wird dadurch maximal entspannt, die Risse bleiben ungefährlich, es können sich keine Risse mehr bilden, die durch den Keramikwerkstoff verlaufen. Zur Durchführung im Fertigungsprozess wird kein zusätzlicher Verfahrensschritt benötigt. Aufgrund der geringen Prozesstemperatur beim Löten wird der Keramikwerkstoff nicht geschädigt.

10016403 "10101

- 5 -

Bei Vielschichtaktoren mit der erfindungsgemäß strukturierten Grundmetallisierung erfolgt deshalb eine Rissbildung ausschließlich entlang der nach außen führenden Innenelektroden, die vorteilhaft unkritisch ist, weil sie die Funktion des Aktors nicht beeinträchtigt.

5 Anhand von Ausführungsbeispielen wird die Erfindung näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 4 eine Grundmetallisierung, die mittels Siebdruck mit einer Terminierungspaste erzeugt worden ist, mit einer erfindungsgemäßen Struktur aus einzelnen Punkten,

Fig. 5 mit einer erfindungsgemäßen Struktur aus einzelnen Linien,

10 Fig. 6 mit einer erfindungsgemäßen netzartigen Struktur und

Fig. 7 mit einer erfindungsgemäßen Struktur, die aus einer vollflächig gedruckten Metallisierung durch mechanisches Abtragen herausgearbeitet worden ist.

Der schematische Aufbau der hier eingesetzten Vielschichtaktoren entspricht dem in Figur 1 dargestellten. Die erfindungsgemäßen Außenelektroden unterscheiden sich von der in den Figuren 2 und 3 dargestellten Außenelektrode durch die Strukturierung der Grundmetallisierung.

Die erfindungsgemäße Strukturierung der Grundmetallisierung wurde an fünf Ausführungsbeispielen geprüft. Dazu wurden zunächst Grundkörper von Vielschichtaktoren entsprechend Figur 1 hergestellt, auf denen in unterschiedlichen Mustern die Grundmetallisierung aufgebracht wurde. Danach wurden die Außenelektroden der Aktoren vervollständigt.

Die Herstellung von Grundkörpern der Aktoren erfolgt wie nachstehend beschrieben: Aus einem niedrig sinternden piezokeramischen Werkstoff, beispielsweise SKN53 nach DE 198 40 488 A1, wird mit einem organischen

- 6 -

- Bindersystem eine 125 µm dicke Folie präpariert. Auf diese Folie wird eine Innenelektrodenpaste aus Silber-Palladium-Pulver in einem Gewichtsverhältnis von 70/30 und einem geeigneten Bindersystem mittels Siebdruck aufgebracht. Eine Vielzahl derartiger Folien wird gestapelt und zu einem Laminat verpresst.
- 5 Das Laminat wird in einzelne, stabförmige Aktoren getrennt, diese werden bei etwa 400 °C pyrolysiert und bei etwa 1100 °C gesintert. Anschließend werden die Aktorgrundkörper an allen Seiten mechanisch bearbeitet.

- Die Grundmetallisierung 3, beispielsweise aus einer geeigneten Silber-Palladium-Terminierungspaste, wird mittels Siebdruck aufgebracht, wobei
- 10 dadurch eine Struktur 15 entsteht, dass die bedruckten Flächen 16 von unbedruckten Flächen 17 unterbrochen sind, wie es in den Figuren 4 bis 6 dargestellt ist. Anschließend erfolgt der Einbrennprozess. Das entstehende punkt-, linien- oder netzartige Raster 15 aus bedruckten Flächen 16 soll so fein wie möglich sein, wobei sichergestellt sein muss, dass jeweils benachbarte
- 15 Innenelektroden 10, die entsprechend Figur 2 an die Oberfläche des Aktors 1 führen, durch mindestens eine aufgedruckte Fläche 16 miteinander verbunden werden. Um das zu erreichen ist es sinnvoll, das Raster 15 unter einem Winkel, in den Figuren 4 bis 6 mit 18 gekennzeichnet, gegenüber der Richtung der Innenelektroden 10 verlaufen zu lassen. Wird die Struktur zu fein, so sinkt die
- 20 Festigkeit des Verbundes zur später aufgetragenen Verstärkungsschicht, beispielsweise einer aufgelöteten Netzelektrode. Bei einem Abstand der Innenelektroden 10 von 100 µm hat sich als besonders vorteilhaft ein bedruckter Bereich 16 der Grundmetallisierung 3 von 0,2 bis 0,3 mm mit gleich großen Unterbrechungen 17 erwiesen.
- 25 Die Grundmetallisierung kann auch durch örtliches mechanisches Abtragen einer ganzflächig aufgetragenen Schicht strukturiert werden, beispielsweise durch Einsägen oder Einritzen. Die Struktur kann weiterhin durch einen elektrochemischen Prozess erzeugt werden, wobei die Tatsache genutzt wird, dass elektrochemisch abgeschiedene Metalle porös sind. Eine derart erzeugte
- 30 Struktur 15 ist in Figur 7 dargestellt.

10016488 110101

- 7 -

Nach dem Einbrennen der Grundmetallisierung werden die Außenelektroden durch die Verstärkungsschicht vervollständigt, beispielsweise durch das Auflöten eines Metalldraht-Netzes. Anschließend können die Aktoren polarisiert und ihre Eigenschaften gemessen werden.

- 5    Nachstehend werden Proben von vier Ausführungsbeispielen mit erfindungsgemäßen Außenelektroden mit Proben mit Außenelektroden nach dem Stand der Technik verglichen.

- 10    Die Aktorgrundkörper der Proben, die entsprechend dem oben beschriebenen Verfahren hergestellt worden sind, haben Abmessungen von 10 x 10 mm<sup>2</sup> Grundfläche und 30 mm Höhe. Die Dicke einer Keramikeinzellage beträgt nach dem Sintern 100 µm, die Dicke einer Innenmetallisierungsschicht 2 µm. Die Aktorgrundkörper werden wie folgt weiterbehandelt:

- 15    Für Aktoren nach dem Stand der Technik als Referenz wird die Grundmetallisierung 3 aus einer geeigneten AgPd Terminierungspaste mittels Siebdruck aufgebracht, wobei keine Struktur erzeugt wird. Die Schicht ist gleichmäßig dick, die Schichtdicke beträgt 8 µm nach dem Einbrennen bei 800 °C.

- 20    Für das erste Ausführungsbeispiel wird die Grundmetallisierung 3 aus einer geeigneten AgPd Terminierungspaste mittels Siebdruck aufgebracht, wobei eine rasterartige Struktur 15 aus runden Punkten 16 erzeugt wird, vergleichbar dem Muster in Figur 4. Der Punktdurchmesser beträgt 0,2 mm, der Freiraum 17 zwischen zwei Punkten ebenfalls 0,2 mm. Das Raster 15 ist unter einem Winkel 18 von 20° zur Richtung der Innenelektroden 10 geneigt, so dass jeweils benachbarte Innenelektroden 10 durch mindestens eine aufgedruckte Fläche 16  
25    miteinander verbunden werden. Die Schicht der Punkte ist gleichmäßig dick, die Schichtdicke beträgt 9 µm nach dem Einbrennen bei 800 °C.

- 8 -

Für das zweite Ausführungsbeispiel wird die Grundmetallisierung 3 aus einer geeigneten AgPd Terminierungspaste mittels Siebdruck aufgebracht, wobei eine linienartige Struktur 15 erzeugt wird, vergleichbar dem Muster in Figur 5. Die Breite der Linien 16 beträgt 0,2 mm, der Abstand 17 zwischen zwei Linien beträgt ebenfalls 0,2 mm. Die Linien 16 sind, wie beim ersten Ausführungsbeispiel, unter einem Winkel 18 gegenüber der Richtung der Innenelektroden 10 geneigt. Die Schicht der Linienstruktur 15 ist gleichmäßig dick, die Schichtdicke beträgt 9 µm nach dem Einbrennen bei 800 °C.

Für das dritte Ausführungsbeispiel wird die Grundmetallisierung 3 aus einer geeigneten AgPd Terminierungspaste mittels Siebdruck aufgebracht, wobei keine Struktur erzeugt wird. Die Schicht ist gleichmäßig dick, die Schichtdicke beträgt 8 µm nach dem Einbrennen bei 800 °C. In der Grundmetallisierung 3 wird ein Raster 15 aus Quadraten 16 erzeugt, indem mittels einer Diamantsäge die Schicht in 0,2 mm große Quadrate 16 aufgetrennt wird, vergleichbar dem Muster in Figur 7. Der Abstand 17 der Quadrate 16 beträgt 0,1 mm. Die Verbindungslinien der Quadrate im Raster 15 verlaufen unter einem Winkel 18 von 35° zur Richtung der Innenelektroden, damit jeweils benachbarte Innenelektroden durch mindestens ein Quadrat überdeckt werden.

Für das fünfte Ausführungsbeispiel, das hier nicht dargestellt ist, wird die Grundmetallisierung elektrochemisch in Form einer Nickelschicht abgeschieden. Die Nickelschicht ist etwa 2 µm dick und wird von einer ebenfalls elektrochemisch abgeschiedenen, 0,1 µm dicken Goldschicht überdeckt. Die Goldschicht verbessert die Lötbarkeit und hat keine andere Funktion. Die Nickelschicht ist verfahrensbedingt nicht völlig geschlossen und hat eine feine netzartige Struktur, wobei Durchbrüche in der Größenordnung des Keramikorns liegen, etwa zwischen 5 und 10 µm.

Auf die fünf Ausführungsbeispiele werden anschließend mit einem geeigneten Prozess die Außenelektroden durch ein aufgelötetes Drahtnetz vervollständigt. Als Netzwerkstoff wird ein dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten der

10016488-110101



OZ 00109

- 9 -

Keramik vergleichbarer Werkstoff, beispielsweise  $\text{FeNi}_{36}$ , verwendet. Der Drahtdurchmesser beträgt  $100\text{ }\mu\text{m}$ , die Maschenweite  $200\text{ }\mu\text{m}$ . Das Netz ist galvanisch vorbehandelt, beispielsweise verkupfert, um die Lötbarkeit zu verbessern. Als Lot wird  $\text{SnAg}_4$  verwendet. Die Lötzeit beträgt 10 Minuten bei

5  $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Nach dem Löten ist optisch erkennbar, dass bei den Varianten 2 bis 5 der Ausführungsbeispiele das Lot die Innenelektroden auch auf den nicht mit Grundmetallisierung versehenen Flächen benetzt hat.

Die Aktoren werden gereinigt und mit einer geeigneten Lackierung isoliert. Nach

10 dem Anlöten der Anschlussdrähte an die Elektrodenetze werden die Aktoren in Prüfraumen mit  $2000\text{ N}$  vorgespannt und mit einem Trapezsignal angesteuert. Dabei wird die Ansteuerspannung in  $100\text{ }\mu\text{s}$  von  $0\text{ V}$  auf  $200\text{ V}$  angehoben,  $1\text{ ms}$  auf  $200\text{ V}$  gehalten, und dann in  $100\text{ }\mu\text{s}$  auf  $0\text{ V}$  erniedrigt. Die Wiederholfrequenz ist  $200\text{ Hz}$ . Die Aktoren erreichen dabei Betriebstemperaturen

15 von  $150$  bis  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Die Variante 1 zeigt bereits bei  $10^6$  Zyklen eine deutliche und starke Rissbildung. Die Risse durchtrennen die Isolierzone in beliebigen Richtungen, Risse entlang der Innenelektroden sind eher selten.

Die Varianten 2 und 3 zeigen nahezu identisches Verhalten, das sich von

20 Variante 1 deutlich unterscheidet. Bei  $10^6$  Zyklen tritt eine kaum sichtbare Rissbildung auf. Bei  $10^7$  Zyklen tritt Rissbildung auf. Die Risse verlaufen alle entlang der Innenelektroden, treten etwa doppelt so häufig auf wie bei der Variante 1, sind aber deutlich schwächer ausgeprägt. Auch nach  $10^8$  Zyklen bleibt dieser Zustand unverändert.

Die Variante 4 zeigt das günstigste Rissverhalten. Erst ab  $10^8$  Zyklen tritt

25 deutliche Rissbildung auf. Die Risse verlaufen ebenfalls alle entlang der Innenelektroden. Bei dieser Variante scheren jedoch die Quadrate des Quadrat-

10016488-110101

- 10 -

Rasters 16 leicht von der Keramik ab. Die Ursache lag darin, dass der Übergang zwischen Grundmetallisierung und Keramik beim Sägeprozess am Rand der Quadrate geschädigt wurde. Durch optimieren der Trennschnitte in der Grundmetallisierung kann eine Beschädigung des Keramikwerkstoffs vermieden werden. Durch geeignete Ätzverfahren kann eine Beschädigung des Keramikwerkstoffs ebenfalls vermieden werden.

Die Variante 5 zeigt ein Rissverhalten wie die Varianten 2 und 3, jedoch ist die Haftfestigkeit des Nickels auf der Keramik nicht ausreichend. Es treten nach und nach örtlich Ablösungen der Grundmetallisierung von der Keramik auf, wodurch die Funktion des Aktors bei langen Laufzeiten beeinträchtigt werden kann.

10016483-110101

### Patentansprüche

1. Außenelektroden (3, 4, 8) an piezokeramischen Vielschichtaktoren (1), bestehend aus einer auf dem Keramikwerkstoff (2) der Oberfläche des Aktors (1) aufgetragenen Schicht einer Grundmetallisierung (3), mit der  
5 mittels einer Verbindungsschicht (8) eine Verstärkungsschicht (4) verbunden ist, an der ein Anschlussdraht (5) angelötet ist, dadurch gekennzeichnet, dass die Schicht der Grundmetallisierung (3) durch Unterbrechungen oder Ausnehmungen (17) strukturiert (15) ist.
- 10 2. Außenelektroden nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur (15) der Grundmetallisierung (3) aus einem Druckmuster einer geeigneten Terminierungspaste besteht, das mittels eines Druckverfahrens erzeugt worden ist.
- 15 3. Außenelektroden nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur (15) der Grundmetallisierung (3) durch einen mechanischen, chemischen oder elektrochemischen Abtrag in einer vollflächig aufgetragenen Schicht der Grundmetallisierung (3) gebildet ist.
- 20 4. Außenelektroden nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Grundmetallisierung (3) aus einer geeigneten Terminierungspaste besteht, die die Zusammensetzung  $Ag_xPd_y$  aufweist, wobei  $x + y = 1$  und  $1 > x > 0$  sind, vorzugsweise aber  $1 > x > 0,7$  ist.
5. Außenelektroden nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur (15) der Grundmetallisierung (3) durch eine poröse elektrochemische Abscheidung eines geeigneten metallischen Werkstoffs gebildet ist.
- 25 6. Außenelektroden nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der metallische Werkstoff Nickel ist.

10016488 110101

- 12 -

7. Außenelektroden nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur (15) der Grundmetallisierung (3) aus über die Oberfläche des Aktors (1) angeordnete Flächen (16) besteht und dass die Flächen (16) mindestens so groß sind, dass jeweils benachbarte  
5 Innenelektroden (10) durch mindestens eine Fläche (16) miteinander verbunden sind.
8. Außenelektroden nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur (15) der Grundmetallisierung (3) aus Punkten (16) besteht, dass der Durchmesser der Punkte (16) der 0,5- bis 5-  
10 fachen Dicke der Keramiklagen (2) des Aktors (1) entspricht, dass der minimale Abstand (17) der Punkte (16) ebenfalls der 0,5- bis 5-fachen Dicke der Keramiklagen (2) des Aktors (1) entspricht und dass eine durch die Punkte (16) verlaufende gerade Linie einen Winkel (18) zu dem Verlauf der Innenelektroden (10) einschließt, der etwa zwischen 10 Grad und 80  
15 Grad, vorzugsweise zwischen 15 Grad und 40 Grad liegt.
9. Außenelektroden nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass der Durchmesser und der Abstand (17) der Punkte (16) der 2- bis 3-fachen Dicke der Keramiklagen (2) des Aktors (1) entsprechen.
10. Außenelektroden nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur (15) der Grundmetallisierung (3) aus  
20 parallelen Linien (16) besteht, dass die Breite der Linien (16) der 0,5- bis 5-fachen Dicke der Keramiklagen (2) des Aktors (1) entspricht, dass der minimale Abstand (17) der Linien (16) ebenfalls der 0,5- bis 5-fachen Dicke der Keramiklagen (2) des Aktors (1) entspricht und dass die Linien (16)  
25 einen Winkel (18) zu dem Verlauf der Innenelektroden (10) einschließen, der etwa zwischen 10 Grad und 80 Grad, vorzugsweise zwischen 15 Grad und 40 Grad liegt.

10016403-110101

- 13 -

11. Außenelektroden nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Breite und der Abstand (17) der Linien (16) der 2- bis 3-fachen Dicke der Keramiklagen (2) des Aktors (1) entsprechen.
- 5 12. Außenelektroden nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur (15) der Grundmetallisierung (3) aus gitternetzartig angeordneten Linien (16) besteht, dass die Breite der Linien (16) der 0,5- bis 5-fachen Dicke der Keramiklagen (2) des Aktors (1) entspricht, dass der minimale Abstand (17) der Linien (16) ebenfalls der 0,5- bis 5-fachen Dicke der Keramiklagen (2) des Aktors (1) entspricht und  
10 dass die Linien (16) des Gitternetzes (15) in einem beliebigen Winkel (18) zueinander und zu dem Verlauf der Innenelektroden (10) stehen.
13. Außenelektroden nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Breite und der Abstand (17) der Linien (16) der 2- bis 3-fachen Dicke der Keramiklagen (2) des Aktors (1) entsprechen.
- 15 14. Außenelektroden nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Verbindungsschicht (8) zwischen Grundmetallisierung (3) und Verstärkungsschicht (4) aus einem Lot besteht, das mindestens eines der Metalle Sn, Ag, Cu, Pb, Au, In, Ga aufweist.
- 20 15. Außenelektroden nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass das Lot ein zinnhaltiger Werkstoff ist, vorzugsweise  $\text{SnAg}_4$  oder  $\text{SnCu}_{0,7}$ .
16. Außenelektroden nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Verbindungsschicht (8) zwischen Grundmetallisierung (3) und Verstärkungsschicht (4) ein elektrisch leitfähiger Klebstoff ist.
- 25 17. Verfahren zur Herstellung von Außenelektroden nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Schicht der

10016400110101

- 14 -

Grundmetallisierung durch Unterbrechungen und Ausnehmungen strukturiert wird.

- 5 18. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur der Grundmetallisierung als Druckmuster mittels eines Druckverfahrens mit einer geeigneten Terminierungspaste erzeugt wird.
19. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur der Grundmetallisierung durch einen mechanischen, chemischen oder elektrochemischen Abtrag in einer vollflächig aufgetragenen Schicht der Grundmetallisierung gebildet wird.
- 10 20. Verfahren nach Anspruch 18 oder 19, dadurch gekennzeichnet, dass die Grundmetallisierung aus einer geeigneten Terminierungspaste erzeugt wird, die die Zusammensetzung  $Ag_xPd_y$  aufweist, wobei  $x + y = 1$  und  $1 > x > 0$  sind, vorzugsweise aber  $1 > x > 0,7$  ist.
- 15 21. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur der Grundmetallisierung durch eine poröse elektrochemische Abscheidung eines geeigneten metallischen Werkstoffs gebildet wird.
22. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass als metallischer Werkstoff Nickel verwendet wird.
- 20 23. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 22, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur der Grundmetallisierung aus über die Oberfläche des Aktors verteilte Flächen gebildet wird und dass mindestens so große Flächen erzeugt werden, dass jeweils benachbarte Innenelektroden durch mindestens eine Fläche miteinander verbunden werden.
- 25 24. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Verstärkungsschicht auf die Grundmetallisierung

10016463-110101

- 15 -

aufgelötet wird, und das das Lot mindestens eines der Metalle Sn, Ag, Cu, Pb, Au, In, Ga aufweist.

25. Verfahren nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, dass das Lot ein zinnhaltiger Werkstoff ist, vorzugsweise  $\text{SnAg}_4$  oder  $\text{SnCu}_{0,7}$ .

5 26. Verfahren nach Anspruch 24 oder 25, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Unterbrechungen in der Struktur der Grundmetallisierung Metall aus dem Lot in die Innenelektroden einlegiert wird und dass der Keramikwerkstoff an diesen Stellen geschwächt wird, wodurch Vorzugsstellen für mögliche Rissbildungen und den Rissverlauf gebildet werden.

10

10016493 "110101

OZ 00109

- 16 -

## Zusammenfassung

### Außenelektroden an piezokeramischen Vielschichtaktoren

Bei Außenelektroden an piezokeramischen Vielschichtaktoren, die in herkömmlicher Weise an die Vielschichtaktoren angebracht werden, wirken  
5 während des Betriebs starke Zugspannungen auf den Isolierbereich unter der Grundmetallisierung. Da dieser Isolierbereich zusammen mit der Grundmetallisierung und der Verbindungsschicht eine homogene Einheit bildet, versagt diese beim Überschreiten der Zugfestigkeit des schwächsten Gliedes und es bilden sich Risse. Die unkontrolliert durch den Isolierbereich verlaufenden  
10 Risse sind sehr kritisch, da sie den Isolationsabstand verringern und die Wahrscheinlichkeit eines Aktorausfalls durch Überschläge stark erhöhen.

Erfindungsgemäß wird deshalb vorgeschlagen, dass die Schicht der Grundmetallisierung (3) durch Unterbrechungen oder Ausnehmungen (17) strukturiert (15) ist.

15 (Fig. 4)

10016468-10101